

| | | |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Amostragem | Sinal de entrada | m(t) |
| PCM | Frequência máxima do sinal Frequência de amostragem | W [Hz] $f_s \geq 2W$ [Hz] |
| | Número de bits por amostra | R |
| | Número de intervalos de quantificação | $L = 2^R$ |
| | Débito binário | $R_b = R f_s$ [bit/s] [Hz] |
| | Potência normalizada | $P_n = P/m_{max}^2$ |
| | Valor máximo de quantificação (PCM) | V |
| | Intervalo de quantificação | $\Delta_q = 2V/L$ |
| | Potência do ruído de quantificação | $\sigma^2 = \Delta_q^2/12$ |
| PCM não uniforme | Relação sinal ruído de quantificação | $SNR \simeq 6.02R + 10 \log_{10} (3P/V^2)$ [dB] |
| DPCM | Relação sinal ruído de quantificação | $SNR \simeq 6.02R - 10$ [dB] |
| | Valor máximo de quantificação (DPCM) | V_1 |
| | Relação sinal ruído de quantificação | $SNR \simeq 6.02R + 10 \log_{10} (3P/V_1^2)$ [dB] |
| Transmissão binária | Tempo de bit | $T_b = 1/R_b$ |
| | Amplitude do código de linha | A |
| | Probabilidade do bit i | p_i |
| | Energia do bit i ($i = \{0, 1\}$) | $E_i = \int_0^{T_b} s_i^2(t)$ |
| | Energia média por bit | $E_b = p_0 E_0 + p_1 E_1$ (tabela 1) |
| | Largura de banda do sinal Transmitido | B_T (tabela 1) |
| | Eficiência espectral | $\rho = R_b/B_T$ |
| | Potência Transmitida | $S_T = E_b R_b$ [W] |
| | factor de <i>rolloff</i> | α |
| | Potência por Hertz do ruído no canal | $N_0/2$ [W/Hz] [J] |
| | Largura de banda do canal de comunicação | $B_c > B_T$ |
| | Relação sinal-ruído no canal | SNR_c [dB] |
| | Probabilidade de erro de bit | (tabela 1) |
| | distância entre símbolos | $2d$ |
| | BER receptor ótimo | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{d^2}{2\sigma_n^2}} \right)$ |
| Transmissão/Modulação M-ária | Número de bits por símbolo | K |
| | Número de símbolos da constelação | $M = 2^K$ |
| | Débito de símbolos | $R_s = R_b/K$ [Baud] |
| | Tempo de símbolo | $T_s = 1/R_s = K T_b$ [s] |
| | Energia média por símbolo | E_s (tabela 2) |
| | Energia do símbolo de menor energia | E_{min} (tabela 2) |
| | Energia média por bit | $E_b = E_s/K$ |
| | Probabilidade de erro de símbolo | P_s (tabela 2) |
| | Probabilidade de erro de bit (código Gray) | $BER = P_s/K$ (tabela 2) |
| | (código aleatório) | $BER = \frac{K+1}{2K} P_s$ |
| Controle de Erros | Débito binário com código | R_b [bit/s] |
| | Débito binário sem código | R'_b [bit/s] |
| | Tempo médio entre erro de bit sem correcção | $T_e = (R_b BER)^{-1}$ [s] |
| | Tempo médio entre erro de bit com correcção | $T'_e = (R'_b BER')^{-1}$ [s] |
| | Número de bits de informação do bloco | k |
| | Número de bits total do bloco | n |
| | Razão do código | $R_c = k/n = R'_b/R_b$ |
| | Probabilidade de erro de bit (sem código) | BER |
| | Probabilidade de erro de bit (com código) | BER' (tabela 3) |
| | Distância mínima de Hamming | d_{min} |
| | Deteção até l erros | $l < d_{min}$ |
| | Correcção até t erros | $t \leq \frac{d_{min}-1}{2}$ |
| | Distribuição binomial: | $f(l n, p) = C_l^n p^l (1-p)^{n-l}$ |
| | Combinações | $C_l^n = \frac{n!}{l!(n-l)!}$ |

| Código | E_b | DC | B_T 1º zero | B_T com <i>rolloff</i> | BER |
|-------------|-----------------------|-----|------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| PNRZ | $A^2 T_b$ | não | R_b | $\frac{1}{2} R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| PRZ | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | não | $2R_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| UNRZ | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | sim | R_b | $\frac{1}{2} R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right)$ |
| Manchester | $A^2 T_b$ | não | $2R_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| BNRZ | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | não | R_b | $\frac{1}{2} R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{3}{4} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right)$ |
| NRZI | $A^2 T_b$ | não | R_b | $\frac{1}{2} R_b (1 + \alpha)$ | $\text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| Manch. dif. | $A^2 T_b$ | não | $2R_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |

Tabela 1: assume-se que $p_0 = p_1$

| | E_b | B_T | BER |
|-------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M-PAM | $\frac{(M^2-1)}{12} T_b a^2$ | $\frac{1}{2K} R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{M-1}{KM} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3K}{M^2-1} \frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| PSK | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| ASK | $\frac{1}{4} A^2 T_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right)$ |
| DPSK | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | $R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{3}{4} \text{erfc} \left(\exp - \frac{E_b}{N_0} \right)$ |
| FSK | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | $f_1 - f_0 + R_b (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right)$ |
| QPSK | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | $\frac{R_b}{2} (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$ |
| MPSK | $\frac{1}{2} A^2 T_b$ | $\frac{R_b}{K} (1 + \alpha)$ | $\frac{1}{K} \text{erfc} \left(\sqrt{K \sin^2(\pi/M)} \frac{E_b}{N_0} \right)$ |
| QAM | $\frac{2(M-1)}{3} \frac{E_0}{K}$ | $\frac{R_b}{K} (1 + \alpha)$ | $\frac{2}{K} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3K}{2(M-1)}} \frac{E_b}{N_0} \right)$ |

Tabela 2:

| Código | d_{min} | BER' |
|--------------------|-----------|-------------------------------------------|
| Paridade | 1 | $(n-1)BER^2$ |
| Repetição (n bits) | n | $C_{\frac{n+1}{2}}^n BER^{\frac{n+1}{2}}$ |
| Hamming | 3 | $\frac{3(n-1)}{2} BER^2$ |

Tabela 3:

| Hamming | polinómio gerador | matriz de paridade |
|------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|
| $H(3, 1) = R(3)$ | $x^2 + x + 1$ | $P = \begin{bmatrix} 111 \end{bmatrix}$ |
| $H(7, 4)$ | $x^3 + x + 1$ | $P = \begin{bmatrix} 110 \\ 101 \\ 011 \end{bmatrix}$ |
| $H(15, 11)$ | $x^4 + x + 1$ | - |

Tabela 4: Matriz geradora: $G = [I_k|P]$; matriz de verificação: $H^T = \begin{bmatrix} P \\ I_{n-k} \end{bmatrix}$
; I_i é a matriz identidade de dimensão $i \times i$.